

VŠB- Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra hydromechaniky a hydraulických zařízení

Měření modulu pružnosti hadice v závislosti na tlaku

*Measurement of Hose Compressibility Module in
Dependence on Pressure*

Student: Michal Galuška
Vedoucí bakalářské práce: Dr. Ing. Lumír Hružík

Ostrava 2009

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě :.....

.....
podpis studenta

Prohlašuji, že

- byl jsem seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. – autorský zákon, zejména §35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a §60 – školní dílo.
- беру на ве́доміі, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB-TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že jeden výtisk bakalářské práce bude uložen v Ústřední knihovně VŠB-TUO k prezenčnímu nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o bakalářské práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu §12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- беру на ве́доміі, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě :

Ostrožská Nová Ves
PSČ 687 22

.....
Podpis studenta

ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Galuška, M. *Měření modulu pružnosti hadice v závislosti na tlaku.*

Ostrava: katedra hydromechaniky a hydraulických zařízení, Fakulta strojní VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2009, 36 s. Bakalářská práce, vedoucí: Hružíka, L.

Bakalářská práce se zabývá experimentálním stanovením modulu pružnosti hadice. V úvodu se zabývám vlastnostmi ovlivňující modul pružnosti. Další kapitola pojednává o metodice a stanovení modulu pružnosti hadice s popisem a schématem celého obvodu. Na základě teorie je provedeno laboratorní měření pro tři hadice ($\varnothing 10\text{mm}$, $\varnothing 16\text{mm}$, $\varnothing 19\text{mm}$) a porovnání naměřených a vypočtených hodnot.

ANNOTATION OF THESIS

Galuška, M. *Measurement of Hose compressibility Module in Dependence on Pressure.*

Ostrava: Department of Hydrodynamice and Hydraulic Equipment, Faculty of Mechanical Engineering VŠB – Technical University of Ostrava, 2009, 36p. Thesis, head: Hružíka, L.

My bachelor work occupies an experimental establishment of Measurement of hose compressibility module in dependence on pressure. At the beginning are said characteristics which effect module of compressibility. Next paragraph deals about a methodology of determination of compressibility hose with the definition and scheme of whole circumference. Based on theory is managed a laboratory measurement for three hoses ($\varnothing 10\text{mm}$, $\varnothing 16\text{mm}$, $\varnothing 19\text{mm}$) and it is done a comparison of determined and calculated figures.

Obsah:

ÚVOD	4
1. STLAČITELNOST	5
1.1 Teorie stlačitelnosti kapalin	5
1.2 Modul pružnosti kapaliny	6
1.3 Vzduch v minerálním oleji	7
1.4 Rozpuštěný vzduch	8
1.5 Vzduch ve formě směsi	9
2. MODUL PRUŽNOSTI	10
2.1 Hookův zákon	10
2.2 Zkouška tahem	11
3. KAPACITA HYDRAULICKÉHO SYSTÉMU.....	12
4. METODIKA EXPERIMENTÁLNÍHO STANOVENÍ MODULU PRUŽNOSTI	
HADIC.....	14
4.1 Modul pružnosti soustavy olej a hadice	15
4.2 Modul pružnosti soustavy olej a trubka	16
5. EXPERIMENTÁLNÍ STANOVENÍ MODULU PRUŽNOSTI HADIC	17
5.1 Schéma zapojení.....	18
5.2 Postup měření.....	19
5.3 Foto měřicího zařízení.....	22
6. LABORATORNÍ MĚŘENÍ	24
6.1 Měřené hadice:	24
7. ZÁVĚR.....	30
8. LITERATURA	31

Seznam použitého značení

Značka	Název	Jednotka
E	Modul objemové pružnosti směsi olej vzduch	[MPa]
E_{ol}	Modul objemové pružnosti oleje	[MPa]
V_{vz}	Objem vzduchu při tlaku atmosférickém	[m ³]
V	Celkový objem směsi olej vzduch při tlaku atmosférickém	[m ³]
V_v	Objem volného vzduchu ve směsi	[m ³]
V_k	Objem kapaliny ve směsi	[m ³]
V_s	Objem směsi kapaliny a volného vzduchu	[m ³]
K_k	Modul pružnosti kapaliny bez volného vzduchu	[MPa]
p	Tlak	[Pa]
n	Polytropický exponent (n=1 pro izotermickou změnu, n=1,4 pro adiabatickou změnu)	[-]
α_ς	Objemová koncentrace vzduchu ve směsi kapaliny a volného vzduchu	[m ³]
Δv	Změna rychlosti	[m ² .s ⁻¹]
η	Dynamická viskozita	[m.s ⁻¹]
τ	Tečné napětí	[N.m ⁻²]
ν	Kinematická viskozita	[m ² .s ⁻¹]
ρ	Hustota	[kg/m ³]
σ_t	Modul pružnosti v tahu	[MPa]
ε	Poměrné prodloužení	[mm]
Δp	Pokles tlaku	[Pa]
Δt	Změna času	[s]
Q	Objemový průtok	[m ³ .s ⁻¹]
V	Objem	[m ³]
g	Tíhové zrychlení	[m.s ⁻²]
β	Součinitel objemové stlačitelnosti kapaliny	[Pa ⁻¹]
ΔV	Změna objemu	[m ³]
K	Modul pružnosti kapaliny	[MPa]
V_{vr}	Objemové množství vzduchu v minerální oleji v rozpuštěném stavu	[m ³]
V_k	Objemové množství oleje	[m ³]

p_2	Hodnota tlaku po zvýšení z p_0	[Pa]
Δh_H	Změna hladiny oleje v odměrné trubici při otevření ventilu UV3, UV4	[mm]
E_H	Modul pružnosti hadice	[MPa]
K_O	Modul pružnosti oleje	[MPa]
p_0	Počáteční tlak	[Pa]

ÚVOD

Ve své práci se zabývám experimentálním stanovením modulu pružnosti hadic. Jde o měření na výukovém trenažeru, který byl sestaven v laboratořích katedry hydromechaniky a hydraulických zařízení VŠB-TU Ostrava.. V České republice je mnoho firem (HYDROMA, HANSA-FLEX, GMS-MOST, RAKORD, EVERFIT...), které vyrábí hadice nejrůznějších délek, světlostí, materiálů, konstrukce a ceny u kterých lze zjišťovat tuto vlastnost.

Za běžných podmínek se modul pružnosti pevných materiálů stanovuje experimentální statickou tahovou zkouškou. U hadic je tato zkouška nedostačující, proto se provádí speciální zkouška pro stanovení modulu pružnosti hadic s ohledem na tlak a teplotu pracovní kapaliny a teplotu okolního prostředí.. Zároveň je nutno zjistit modul pružnosti kapaliny v hadici. Velikost modulu pružnosti u kapalin závisí na mnoha faktorech, zejména na obsahu volných plynů v kapalinách a dále na tlaku a teplotě kapaliny.

Cílem bakalářské práce je experimentálně stanovit modul pružnosti hadice v závislosti na tlaku. Nejdříve se provede měření. Potom, na základě naměřených údajů, se vypočtou moduly pružnosti pomocí výpočtových vzorců a vytvoří se grafy, které se porovnají mezi sebou.

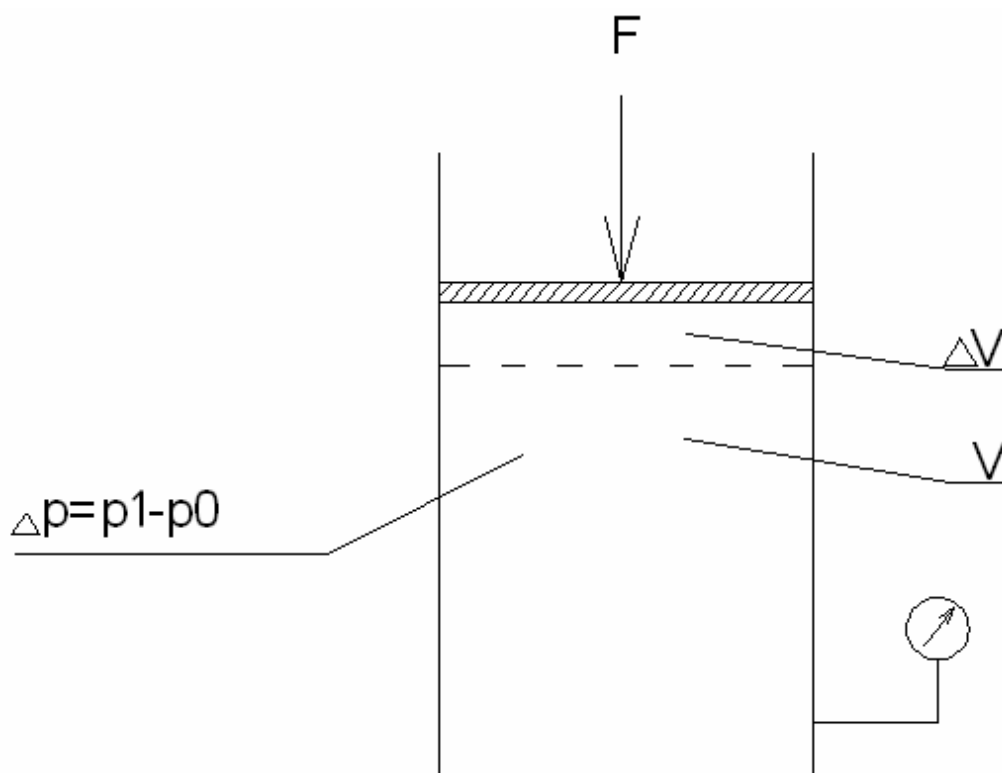
1. STLAČITELNOST

1.1 Teorie stlačitelnosti kapalin

Významnou fyzikální vlastností kapalin, která se přímo týká modulu pružnosti je stlačitelnost kapalin.

Stlačitelnost kapaliny představuje schopnost měnit svůj objem při změně tlaku. Při zvýšení tlaku (v uzavřené nádobě, potrubí...) dochází ke zmenšení původního objemu kapaliny a naopak při poklesu tlaku nastává zvětšení původního objemu. [10] Modul pružnosti kapaliny se obecně mění s tlakem a teplotou. Tato změna se projeví při velkých tlakových a tepelných změnách. Závislost stlačitelnosti jak na tlaku, tak na teplotě je nelineární. Stlačitelnost se vyjadřuje součinitelem stlačitelnosti β , kdy úbytek objemu vyvolaný stlačením splňuje rovnici. [7]

$$\beta = \frac{\Delta V}{\Delta p} \cdot \frac{1}{V} \quad (1.1)$$



Obr. 1 Stlačování pomocí vnější síly

1.2 Modul pružnosti kapaliny

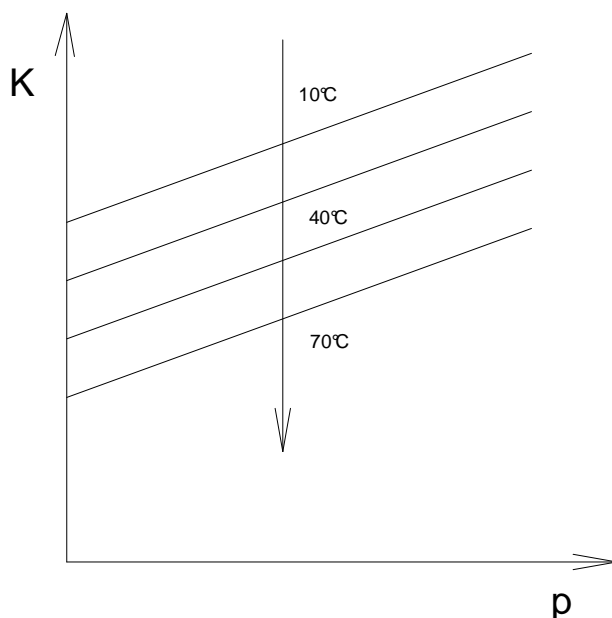
Míra odporu materiálu vůči deformaci, tj. míra tuhosti materiálu, je definována poměrem síly působící kolmo na jednotku plochy k deformaci, kterou tato síla působí v oblasti malých deformací. Jednotkou modulu pružnosti jsou obvykle megapascaly (MPa).

Modul pružnosti kapalin je velmi úzce spojen se stlačitelností.

Modul pružnosti vychází ze součinitele objemové stlačitelnosti kapaliny β , který je definován při konstantní teplotě vztahem (1.1)

Převrácená hodnota součinitele objemové stlačitelnosti kapaliny je modul pružnosti kapaliny K :

$$K = \frac{1}{\beta} = -V \cdot \frac{dp}{dV} \quad (1.2)$$



Obr. 2 Modul pružnosti závislý na tlaku a teplotě

Tab. 1 Moduly pružnosti některých druhů kapalin

Kapalina	Modul pružnosti [Pa]
Voda	$2 \cdot 10^9$
Minerální olej	$(1,4 \div 1,8) \cdot 10^9$
Glycerin	$(4,5 \div 5,0) \cdot 10^9$
Syntetické kapaliny	$(1,0 \div 1,3) \cdot 10^9$
Letecký olej	$2,0 \cdot 10^9$
Produkty nafty	$1,4 \cdot 10^9$
Emulze do 10% oleje ve vodě	$2,0 \cdot 10^9$
Voda 18 °C	$2,1 \cdot 10^9$

Modul pružnosti pro ocel $K_0 = (2,06 \cdot 10^{11} - 2,1 \cdot 10^{11})$ Pa, z toho vyplývá, že voda je 100x stlačitelnější než pevné části (ocel)

1.3 Vzduch v minerálním oleji

Směs olej + vzduch

V každém litru oleje se rozpustí ve formě molekul 9% vzduchu. Tento nepříznivý účinek zvyšuje jeho stlačitelnost, která ovlivňuje statické a zejména dynamické vlastnosti hydraulických prvků a systémů. Důsledkem je snížení objemové účinnosti hydrogenerátoru a hydromotoru. Nižší tuhost může přivodit jeho nestabilitu. V hydrogenerátoru zhoršuje mazání a může být příčinou místní kavitace. K uvolňování absorbovaného plynu nastává tehdy, jestliže tlak poklesne pod tlak nasycení kapaliny plynem (pod tlak nasycených par). Proto se umísťuje čerpadlo (hydrogenerátor) na hladinu, nebo v lepším případě pod hladinu aby vznikl přetlak.

Orientační obsah vzduchu v oleji při tlakových změnách [2]

Obsah vzduchu v oleji při atmosférickém tlaku $\varphi_{v,0} = 11,76\%$

Obsah vzduchu v oleji při izotermické kompresi $\varphi_{vp} = 0,132\%$

Obsah vzduchu v oleji při polytropické kompresi $\varphi_{v,0} = 0,492\%$

V minerálním oleji, který je dnes nejčastěji používaným nositelem energie v hydraulických mechanismech se vzduch (nebo jakýkoliv jiný plyn) vyskytuje ve dvou modifikacích: jako rozpuštěný, nebo jako nerozpuštěný ve směsi s olejem. Rozpustnost plynu v kapalině stoupá s tlakem a u minerálních olejů i s teplotou. K uvolňování absorbovaného plynu nastává tehdy, jestliže tlak poklesne pod tlak nasycení kapaliny plynem. U minerálních olejů bylo zjištěno, že již podtlak (0,02 – 0,03 MPa) na sání HG způsobí takové vylučování plynu, které se projeví změnou barvy kapaliny. Jestliže je tato směs vzápětí prudce stlačována v HG, bublinky se zahřejí až na teplotu 600-700°C a zároveň implodují za vzniku silného hluku. Důsledkem je stárnutí, karbonizace a silný hluk který se stanoví dle vztahu: [2].

$$K = \frac{p \cdot \frac{V_k}{V_v} + 98066}{p \cdot \frac{V_k}{V_v} + \frac{98066}{p} \cdot K_0} [\text{N.m}^{-2}] \quad (1.3)$$

Nepříznivý účinek v hydraulických mechanismech má pouze vzduch nerozpuštěný tím se zvyšuje jeho stlačitelnost, která ovlivňuje statické a dynamické vlastnosti hydraulických prvků a systémů.

Volný vzduch v kapalině se významně projeví ve zvýšení stlačitelnosti kapaliny, tzn. hodnota modulu pružnosti kapaliny se sníží. Modul pružnosti kapaliny s volným vzduchem se rovněž stanoví dle vztahu [2]:

$$K_s = \frac{K_K \cdot n \cdot p}{n \cdot p \cdot \alpha_v \cdot (K_K - n \cdot p)} \quad (1.4)$$

1.4 Rozpuštěný vzduch

V tomto stavu představuje vzduch chemickou vazbu atomů kyslíku a dusíku. Rozpuštění vzduchu v oleji se řídí Henryho zákonem [2]:

$$V_{vr} = V \cdot k \cdot \frac{p_2}{p_0} \quad (1.5)$$

K nasycení oleje vzduchem dochází v důsledku změny tlaku či teploty oleje. Dochází k uvolňování molekul vzduchu a ke vzniku bublin, čímž se vytváří směs oleje se vzduchem. Doba, v níž dochází k rozpuštění vzduchu v oleji je mnohem delší, než při jeho uvolňování a je závislá na 3 hlavních faktorech:

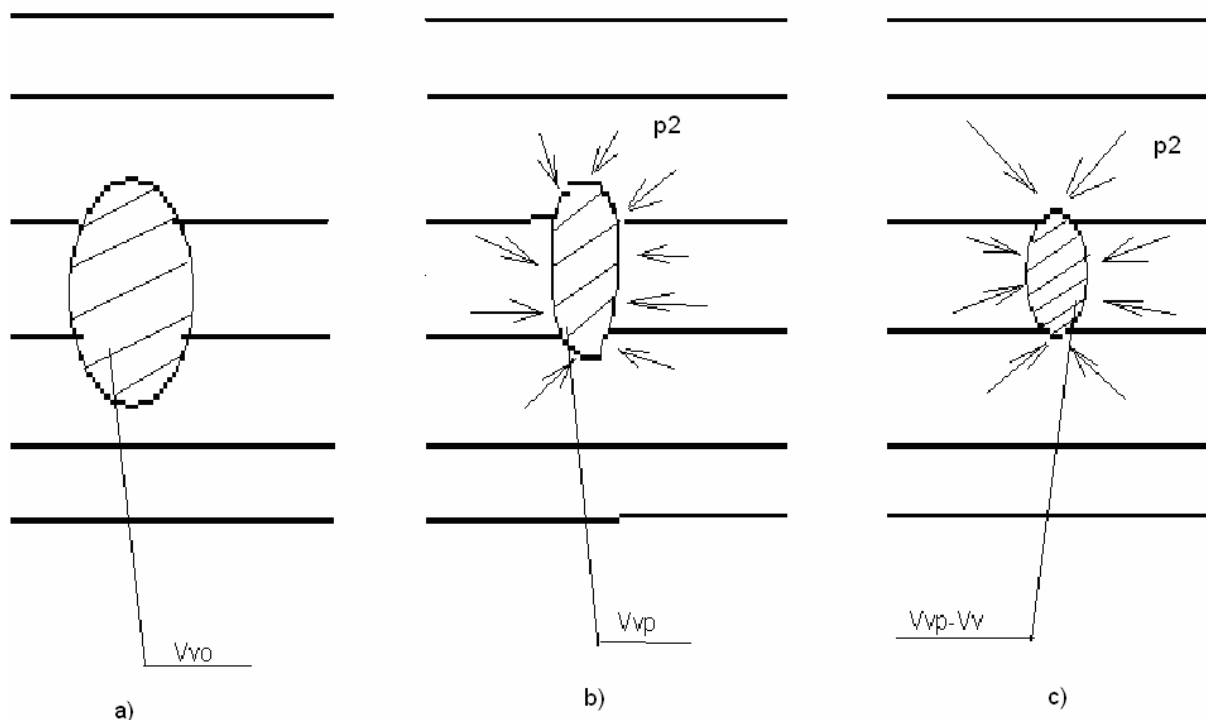
- na povrchu styku oleje se vzduchem
- na viskozitě oleje
- na pohybovém stavu oleje

Asi 25-30% vzduchu se rozpustí v oleji okamžitě, tj. za dobu do 1 vteřiny, což se vysvětluje okamžitým nasycením tenké vrstvy oleje ve styku se vzduchem .

1.5 Vzduch ve formě směsi

Základním principem při tvorbě oleje se vzduchem, je uvolňování rozpuštěného vzduchu z oleje při změně tlaku, teploty a rychlosti proudění, dále v přísávání vzduchu netěsnostmi vedení a nádrže, v provzdušňování oleje nesprávně upravenými výtoky apod. Tato směs mění podstatně vlastnosti oleje, přičemž je lhostejné, zda množství vzduchu je rozděleno na málo velkých bublin, nebo na mnoho malých. Tento uvolněný vzduch z oleje zhoršuje i jeho mechanické vlastnosti. [6]

Zjištění množství okamžitého obsahu vzduchu ve směsi je velmi složité. Je to dáno stlačováním v hydrogenerátoru nebo ve vedení a jeho současným, částečným a postupným rozpouštěním. **Modul pružnosti oleje se zmenšuje se zvyšujícím se obsahem vzduchu v oleji.** [3]



Obr. 3 Změna objemu vzduchové bubliny

a) při atmosférickém tlaku, b) při působení tlaku p , c) při působení tlaku p a rozpouštění

2. MODUL PRUŽNOSTI

2.1 Hookův zákon

Popisuje pružnou deformaci materiálu působením síly, za předpokladu sil a deformací, které po odlehčení zmizí. Lze jej formulovat např. ve tvaru:

$$\sigma_t = E \cdot \varepsilon \quad (2.1)$$

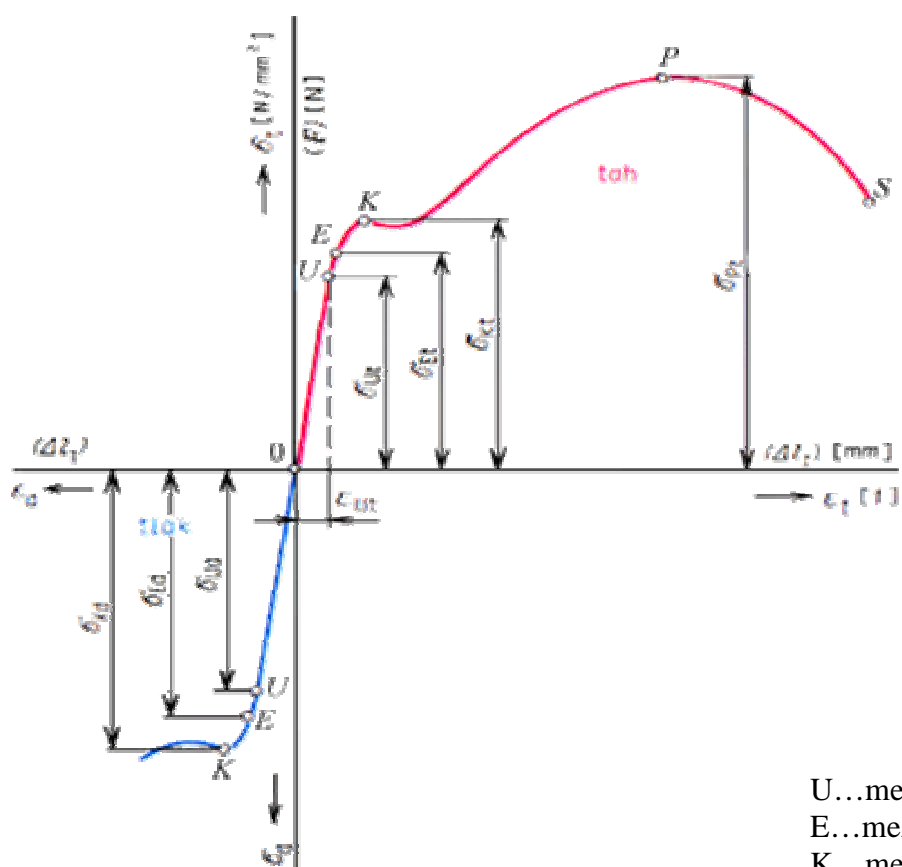
Deformace tělesa je změna jeho tvaru díky působení vnější síly. Tyto síly mohou být tažné, tlakové, smykové, ohybové nebo torzní. Těleso se po deformaci nachází v deformovaném stavu.

Pokud nezůstane nijak deformované, jedná se o deformace elastické. Pokud zůstane deformované, jedná se o deformaci plastickou.

Napětí vyvolané v tělese vnějšími silami způsobuje jeho deformaci. Avšak proti vnějším silám působí síly vnitřní, snažící se udržet atomy (ionty) v původních polohách a tak deformaci zabránit.

Modul pružnosti se za normálních podmínek stanovuje pomocí tahové zkoušky na trhačím stroji. Při této zkoušce jsou používány normalizované materiálové vzorky, které jsou namáhány tahem.

2.2 Zkouška tahem



U...mez úměrnosti
E...mez pružnosti
K...mez kluzu
P...mez pevnosti
S...roztržení vzorku

Obr. 4 Pracovní diagram tahové zkoušky

Zkušební těleso zatěžujeme plynule rostoucí silou bez rázů a chvění až do doby, kdy dojde k jeho přetržení. Výsledkem statické tahové zkoušky je pracovní diagram udávající závislost tahového napětí σ_t na poměrném prodloužení ϵ . Na obr. 4 je znázorněn pracovní diagram pro měkkou ocel.

Nevýhodou tahové zkoušky je časová náročnost s výrobou vzorku a následným vyhodnocením zkoušky. Dále dochází ke znehodnocení vzorku, protože se jedná o destrukční zkoušku.

3. KAPACITA HYDRAULICKÉHO SYSTÉMU

Jedním z důležitých parametrů vstupujících do výpočtů statického režimu práce hydraulického mechanismu, je kapacita. Kapacita systému je dána pružnými elementy, tj. především stlačitelností kapaliny a deformacemi potrubí (pryžové hadice). Přesné hodnoty pro výpočet modulu pružnosti můžeme použít u ocelového potrubí, kde je to známá hodnota $E = 2,1 \cdot 10^{11}$ Pa. [5]

Pro výpočet stlačitelnosti kapaliny musíme uvažovat s přítomným vzduchem, jehož množství pouze odhadujeme.

Zjištění hodnoty kapacity můžeme použít k opravnému výpočtu statického režimu, nebo může být naším cílem zlepšení dynamických vlastností, např. snížení tlakových špiček. Vztah pro přírůstek tlaku Δp platí:

$$\Delta p = \frac{1}{C} \cdot \int Q dt \quad (3.1)$$

$$\Delta p = \frac{1}{C} \cdot Q \cdot \Delta t \quad (3.2)$$

Měřeným objektem může být buď celý hydraulický systém, nebo jeho část (úsek potrubí).

Na odporu proti deformaci dochází k přeměně tlakové energie pracovní kapaliny v energii deformační. Deformují se všechny části hydraulického obvodu, na něž kapalina působí svým tlakem. Deformuje se potrubí a hadice v důsledku pružnosti materiálu, deformují se i ostatní části obvodu a stlačuje se i samotná pracovní kapalina. Deformace jsou většinou pružné, proto je tato změna vratná. Změna tlaku je spojena se změnou objemu kapaliny [4]:

$$\Delta p = D \cdot \Delta V \quad (3.3)$$

Převrácená hodnota odporu proti deformaci se nazývá hydraulická kapacita C:

$$C = \frac{1}{D} \quad (3.4)$$

Tlakový spád na odporu proti deformaci:

$$\Delta p = D \cdot \int Q \cdot dt \quad (3.5)$$

Součinitel úměrnosti D nazýváme odpor proti deformaci. Tlakem kapaliny se zmenší její objem o objem ΔV , který je zaplňován proudem kapaliny Q.

$$d\Delta V = Q \cdot dt \quad (3.6)$$

$$\Delta V = \int Q \cdot dt \quad (3.7)$$

Typickými kapacitami v obvodu jsou hydraulické akumulátory, hadice, pružná potrubí. Značnou kapacitu má i pracovní kapalina. Jednoduché kapacity vypočítáváme, složitější měříme. Pro pracovní kapalinu o objemu V a modulu pružnosti K lze odvodit:

$$D = \frac{K}{V} \quad [\text{Nm}^{-5}] \quad (3.8)$$

$$C = \frac{V}{K} \quad [\text{Nm}^{-5}] \quad (3.9)$$

Odpor proti deformaci pružné trubky, která se roztahuje na průměru, se vypočte ze vztahu:

$$D = \frac{s \cdot E}{V \cdot d} \quad (3.10)$$

Odpor proti deformaci kapaliny v potrubí a vlastního potrubí při uvažování pružnosti potrubí se sčítá a po úpravě dostaneme:

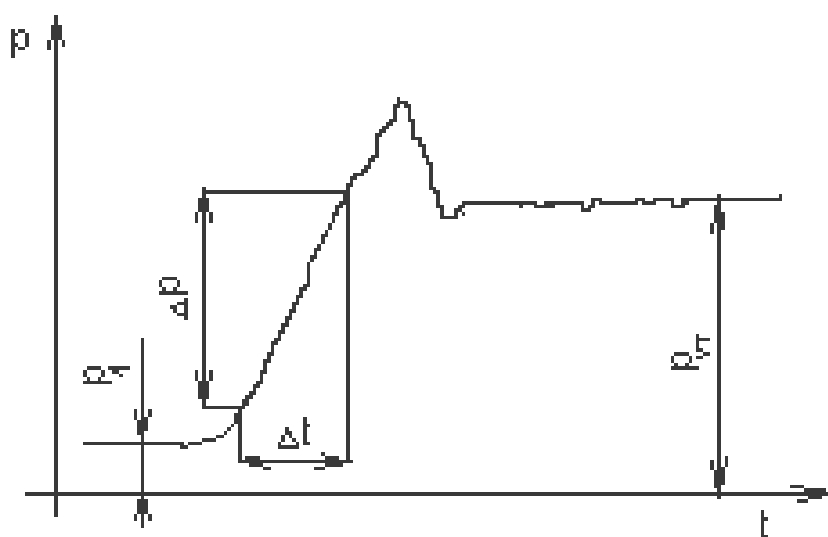
$$\frac{1}{D} = \frac{1}{D_K} + \frac{1}{D_P} = \frac{V}{K} + \frac{V \cdot d}{s \cdot E}$$

úpravou :

$$D = \frac{K}{V} \cdot \frac{1}{1 + \frac{K \cdot d}{s \cdot E}} \quad (3.11)$$

Modul pružnosti je možno stanovit i pomocí dynamického režimu při vyvolání skokové změny, viz. obr.5. Otevřením ventilu, nateče kapalina do potrubí a začne jej plnit. Tato změna

vyvolá zvýšení tlaku v potrubí o hodnotu Δp , který snímáme pomocí snímače za čas Δt , který měříme rovněž pomocí snímače, na kterém se nastaví časové impulsy. Dynamický modul pružnosti bývá odlišný od statického modulu pružnosti. Jako zdroj průtoku musí být použit hydrogenerátor s velmi tvrdou charakteristikou, to je s nepatrnými průtokovými ztrátami. Pojistný ventil nastavíme na podstatně vyšší tlak než předpokládané tlakové špičky a jeho citlivost snížíme.



Obr. 5 Měření hydraulické kapacity

4. METODIKA EXPERIMENTÁLNÍHO STANOVENÍ MODULU PRUŽNOSTI HADIC

Statický modul pružnosti soustavy minerálního oleje a trubky se stanoví experimentálně ze změřeného množství kapaliny, která v důsledku stlačitelnosti kapaliny a trubky vyteče z trubky do odměrné nádoby při poklesu tlaku v trubce, na tlak atmosférický. Následně se vypočte modul pružnosti oleje. Modul pružnosti soustavy olej a hadice se stanoví experimentálně ze změřeného objemu kapaliny, která v důsledku stlačitelnosti hadice a kapaliny vyteče z hadice do odměrné nádoby při poklesu tlaku v hadici z hodnoty tlaku pracovního, na tlak atmosférický. Následně se vypočte modul pružnosti hadice při znalosti modulu pružnosti oleje. [1]

Pro stanovení modulu pružnosti oleje a hadice se vychází ze skutečnosti, že celková kapacita soustavy olej + hadice $C_{O,H}$ je dána součtem dílčích kapacit, tzn. kapacity oleje C_O a kapacity hadice C_H [2.3.4]:

4.1 Modul pružnosti soustavy olej a hadice

$$C_{O,H} = C_O + C_H \quad (4.1)$$

Pro jednotlivé kapacity platí následující vztahy:

Hydraulická kapacita soustavy olej + vzduch

$$C_{O,H} = \frac{\Delta V_{O,H}}{\Delta p} \quad (4.2)$$

Hydraulická kapacita olej

$$C_O = \frac{V_{O,H}}{K_0} \quad (4.3)$$

Hydraulická kapacita hadice

$$C_H = \frac{V_{O,H} \cdot d_H}{E_H \cdot s_H} \quad (4.4)$$

Po dosazení rovnic (4.2), (4.3), (4.4) do rovnice (4.1) a matematických úpravách se vypočte modul pružnosti hadice dle vztahu:

$$E_H = \frac{1}{\left(\frac{\Delta V_{O,H}}{V_{O,H} \cdot \Delta p} - \frac{1}{K_O} \right) \cdot \frac{s_H}{d_H}} \quad (4.5)$$

Pro přírůstek objemu oleje v důsledku stlačitelnosti oleje a hadice platí rovnice:

$$\Delta V_{O,H} = \frac{\pi \cdot d_0^2 \cdot \Delta h_H}{4} \quad (4.6)$$

Objem oleje v hadici:

$$V_{O,H} = \frac{\pi \cdot d_H^2}{4} \cdot l_H \quad (4.7)$$

Modul pružnosti oleje se stanoví dle vztahu (4.8):

$$K_O = \frac{1}{\frac{\Delta V_{O,TR}}{V_{O,TR} \cdot \Delta p} - \frac{d_{TR}}{E_{TR} \cdot s_{TR}}} \quad (4.8)$$

4.2 Modul pružnosti soustavy olej a trubka

Hydraulická kapacita soustavy olej + trubka:

$$C_{O,TR} = C_O + C_{TR} \quad (4.9)$$

Modul pružnosti soustavy olej a trubka:

$$K_{O,TR} = \frac{V_{O,TR} \cdot \Delta p}{\Delta V_{O,TR}} \quad (4.10)$$

Hydraulická kapacita soustavy olej + trubka:

$$C_{O,TR} = \frac{\Delta V_{O,TR}}{\Delta p} \quad (4.11)$$

Hydraulická kapacita oleje:

$$C_O = \frac{V_{O,TR}}{K_O} \quad (4.12)$$

Hydraulická kapacita trubky:

$$C_{TR} = \frac{V_{O,TR} \cdot d_{TR}}{E_{TR} \cdot s_{TR}} \quad (4.13)$$

Po dosazení do rovnic (4.11), (4.12), (4.13), a matematických úpravách se vypočte modul pružnosti oleje dle vztahu:

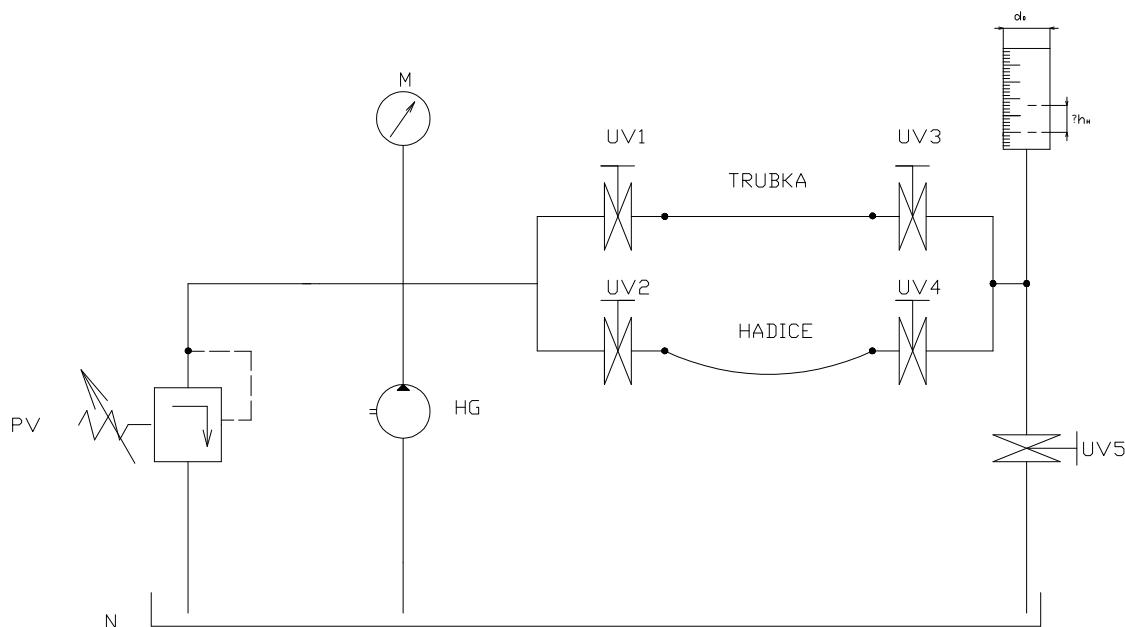
$$K_O = \frac{1}{\frac{\Delta V_{O,TR}}{V_{O,TR} \cdot \Delta p} - \frac{d_{TR}}{E_{TR} \cdot s_{TR}}} \quad (4.14)$$

5. EXPERIMENTÁLNÍ STANOVENÍ MODULU PRUŽNOSTI HADIC

Zjednodušené schéma experimentálního zařízení pro stanovení modulu pružnosti hadic je znázorněno na obr. 6. Ve výchozím stavu jsou ventily UV1 až UV5 uzavřeny a kapalina proudí od hydrogenerátoru HG přes pojistný ventil PV zpět do nádrže N.

Před vlastním měřením je nutno měřicí trať odvzdušnit. Jinak by hodnoty modulu pružnosti oleje včetně vzduchových bublin vyšly nižší než hodnoty modulu pružnosti oleje bez volného vzduchu.

Jak již bylo zmíněno, na statický modul pružnosti hadic má vliv tlak a teplota pracovní kapaliny, teplota okolí apod. V případě hydraulických hadic má významnou roli zejména příčná deformace průřezu hadice. Následně se experimentálně stanoví modul pružnosti hadice pro oblast stacionárních a kvazistacionárních dějů. [8] Pro dynamické děje je nutno uvažovat s řadou dalších vlivů na modul pružnosti hadice jako frekvenční závislost apod. Měření modulu pružnosti se stanoví nepřímo, kdy se měří objem kapaliny, která v důsledku stlačitelnosti hadice a kapaliny vyteče z hadice do odměrné nádoby při poklesu tlaku v hadici z hodnoty tlaku pracovního na tlak atmosférický. Kapalínou je minerální olej.



Obr. 6 Schéma zařízení pro měření modulu

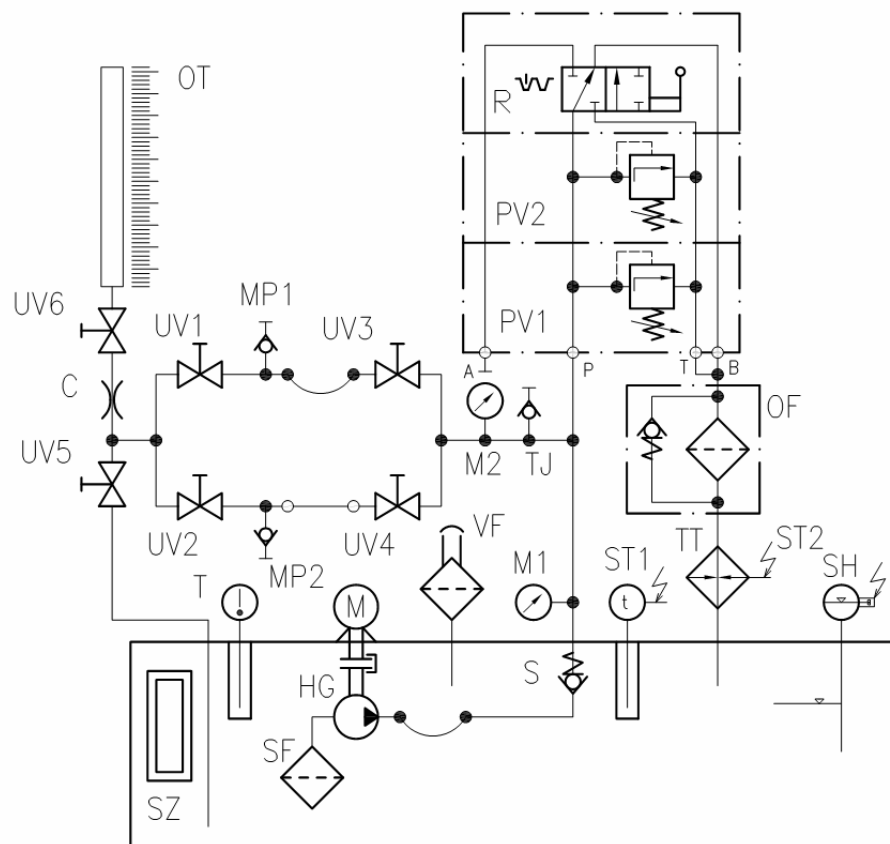
Modul pružnosti hadic je ovlivňován řadou veličin, např. tlakem a teplotou pracovní kapaliny, teplotou okolního vzduchu apod. Kromě toho nejsou materiály hadic za normálních podmínek

izotropní, respektive hodnoty modulu pružnosti hadic dosahují odlišných hodnot v závislosti na směru namáhání (tzn. příčné a podélné). V případě hydraulických hadic má významnou roli zejména příčná deformace průřezu hadice. Z výše uvedených důvodů by běžná tahová zkouška materiálu hadice byla nedostačující. [12]

Pro stanovení modulu pružnosti hadic se používá speciální zkouška, při které lze stanovit modul pružnosti hadice v závislosti na tlaku, teplotě pracovní kapaliny a teplotě okolního prostředí. Stanovení modulu pružnosti hadice má u hydraulických systémů velký význam, neboť modul pružnosti významně ovlivňuje dynamické vlastnosti hydraulického obvodu a tím i jeho bezproblémový provoz. A proto se tato tahová zkouška u hadic nevyužívá a nahrazuje se zkouškami jinými, účinnějšími a přesnějšími.

5.1 Schéma zapojení

Schéma zapojení hydraulického obvodu pro experimentální stanovení modulu pružnosti minerálního oleje a hadice je znázorněno na obr. 7.



Obr. 7 Schéma obvodu pro experimentální stanovení modulu pružnosti minerálního oleje a hadice

Specifikace prvků k obr. 7:

- hydrogenerátor HG: GHPA1-D-2, $Q = 2 \text{ dm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$, Marzocchi,
- pojistný ventil PV1: BS320C3001, Aron,
- pojistný ventil PV2: AM3VMPPM3003, Aron,
- rozváděč R: AD3L17FZD14, Aron,
- hliníková nádrž N: $V_N = 30 \text{ dm}^3$, MP Filtri,32
- zpětný ventil ZV: $\Delta p = 0,3 \text{ bar}$, Aron,
- sací filtr SF: MP Filtri,
- odpadní filtr OF: MPS 050, filtrační vložka CS 070 A10 A, MP Filtri,
- teploměr T: DTU 0-120 C 250 mm, Metra Šumperk,
- topná spirála TT: typ 440990150, 220 V, 500 W, Backer elektro,
- manometry M1, M2: $\varnothing 63 \text{ mm}$ s glyc., rozsah do 400 bar, Italmanometri,
- kulové ventily UV1, UV2, UV3, UV4: V2MT 402.1014 JG 20S, Inteva,
- kulové ventily UV5, UV6: V2MT 402.1013 JG 15L, Inteva,
- skleněná trubice OT: vnitřní / vnější průměr: 9,8 mm / 13 mm, Vitrum,
- měřené hadice H:
 - a) HANSA – FLEX EN 853 2SN 16WP 250 bar x 1600 (světlost $d_H = 16 \text{ mm}$, délka $l_H = 1,6 \text{ m}$)
 - b) HANSA-FLEX HD 210 EN 853 2SN 10WP 330 bar x 1500 (světlost $d_H = 10 \text{ mm}$, délka $l_H = 1,5 \text{ m}$)
 - c) HANSA-FLEX HD 520 EN 856 4SH 19 WP 420 bar x 1500 (světlost $d_H = 19 \text{ mm}$, délka $l_H = 1,5 \text{ m}$)
- měřená trubka (ocelová) TR: 30x4, (délka $l_{TR} = 1,5 \text{ m}$, světlost $d_{TR} = 22 \text{ mm}$, tloušťka stěny $S_{TR} = 4 \text{ mm}$, modul pružnosti $E_{TR} = 2,1 \cdot 10^{11} \text{ Pa}$)

5.2 Postup měření

1) Pozor: Vždy před spuštěním hydraulického agregátu musí být ventil UV6 uzavřen aby nedošlo k úniku kapaliny do okolí přes odměrnou skleněnou trubici OT. V případě že je spuštěn hydraulický agregát a probíhá vlastní měření nesmí se nikdy při otevřeném ventilu UV6 otevřít zároveň oba ventily UV1 a UV3 nebo UV2 a UV4. Kapalina by proudila z hydrogenerátoru přes trubku nebo hadici do odměrného válce a došlo by k úniku kapaliny

přes odměrný válec do okolí! Vždy před spuštěním hydraulického agregátu proto zkontrolujte zda je ventil UV6 řádně uzavřen.

2) Pojistný ventil PV1 je nastaven na 250 bar a slouží k ochraně obvodu proti přetížení. S tímto ventilem se během měření v žádném případě nesmí manipulovat!

3) Hydraulický agregát se spouští vždy bez zatížení! Rozváděč se nastaví do polohy 1 umožňující průtok kapaliny do nádrže. Ventily UV1 až UV5 jsou otevřeny, pojistný ventil PV2 je nastaven na minimální hodnotu tlaku.

4) Modul pružnosti oleje K_O zjistíme z experimentálně stanovené hydraulické kapacity soustavy olej + trubka.

Ve výchozím stavu jsou uzavírací ventily UV1, UV3 a UV6 uzavřeny, ventily UV2, UV4 a UV 5 jsou otevřeny. Rozváděč R je v poloze 1, kdy kapalina přes něj může protékat.

Před spuštěním agregátu nastavíme na pojistném ventilu PV2 minimální hodnotu tlaku. Spustíme hydraulický agregát. Rozváděč R přestavíme do polohy 2, kdy kapalina přes rozváděč neprotéká a uzavřeme ventil UV 4. Na manometru M1 umístěném na výstupu agregátu se nastaví velikost tlaku p pojistným ventilem PV2. Následně se otevře ventil UV4, tlak v trubce poklesne a kapalina protéká trubicí TR do nádrže.

Uzavřeme ventil UV5. Po natlakování trubky se uzavře ventil UV4 a odečte se tlak p na manometru M2. Aby se odlehčil hydrogenerátor, tedy aby kapalina neprotékala přes pojistný ventil PV2 a nedocházelo k zahřívání kapaliny, přestaví se po uzavření ventilu UV2 rozváděč R do polohy 1 umožňující průtok kapaliny. Kapalina protéká přes rozváděč R do nádrže N a zároveň dojde k poklesu tlaku na manometrech M1, M2.

Otevře se ventil UV6. Po následném otevření ventilu UV4 dojde k poklesu tlaku Δp v trubce z tlaku p na tlak atmosférický. Pokles tlaku Δp v trubce je tedy roven dříve změřenému tlaku p na manometru M2: $\Delta p = p$. Část objemu kapaliny $\Delta V_{O,TR}$, která vyteče z trubky v důsledku stlačitelnosti kapaliny a trubky, způsobí stoupnutí hladiny v odměrné skleněné trubici OT o hodnotu Δh_{TR} , která se zaznamená. Uzavře se ventil UV4. V případě, že je odměrná skleněná trubice naplněna minerálním olejem, vypustí se potřebné množství oleje z trubice otevřením ventilu UV5. Sleduje se pokles hladiny v odměrné trubici. Uzavře se ventil UV5 tak, aby ve spodní části trubice zůstal minerální olej (trubice se nevypustí úplně). Následně se uzavře ventil UV6.

Měření se opakuje pro různé hodnoty tlaku p . Modul pružnosti minerálního oleje K_O se stanoví ze vztahu (4.5).

5) Po ukončení měření modulu pružnosti oleje nastavíme na pojistném ventilu PV2 minimální hodnotu tlaku.

6) Modul pružnosti hadice stanovíme z experimentálně zjištěné hydraulické kapacity soustavy olej + hadice.

Ve výchozím stavu jsou uzavírací ventily UV2, UV4 a UV6 jsou uzavřeny, ventily UV1, UV3 a UV 5 jsou otevřeny. Rozváděč R je v poloze 1, kdy kapalina přes něj může protékat. Na pojistném ventilu PV2 je nastaven minimální tlak.

Rozváděč R přestavíme do polohy 2, kdy kapalina přes rozváděč neprotéká a uzavřeme ventil UV3. Pomocí pojistného ventilu PV2 se nastaví tlak p na manometru M1 umístěném na výstupu agregátu. Následně se ventil UV3 otevře, tlak v hadici poklesne a kapalina protéká hadicí H do nádrže. Uzavřeme ventil UV5. Po natlakování hadice se uzavře ventil UV3 a odečte se tlak p na manometru M2. Následně se uzavře ventil UV1 a rozváděč R se přestaví do polohy 1, kdy kapalina přes něj protéká, čímž se odlehčí hydrogenerátor. Kapalina protéká přes rozváděč R do nádrže N a zároveň dojde k poklesu tlaku na manometrech M1, M2.

Otevře se ventil UV6. Po následném otevření ventilu UV3 dojde k poklesu tlaku Δp v hadici na tlak atmosférický. Pokles tlaku Δp v trubce je tedy roven dříve změřenému tlaku p na manometru M2 $\Delta p = p$. V důsledku stlačitelnosti kapaliny a hadice část objemu kapaliny $\Delta V_{O,H}$ vyteče z hadice a způsobí stoupnutí hladiny v odměrné trubici OT o hodnotu Δh_H . Měří se velikost stoupnutí hladiny Δh_H v odměrné nádobě ON. Uzavře se ventil UV3. Odměrná trubice OT se po naplnění kapalinou vyprázdní pomocí ventilu UV5. Sleduje se pokles hladiny v odměrné trubici a ventil UV5 se uzavře tak, aby ve spodní části trubice zůstal minerální olej. Následně se uzavře ventil UV6.

Měření se opakuje pro různé velikosti tlakového spádu Δp . Modul pružnosti hadice E_H se stanoví z rovnice (4.12).

7) Tlaky je možné odečítat rovněž pomocí snímačů tlaku připojených přes Minimes připojky umístěné před ventily UV3 a UV4.

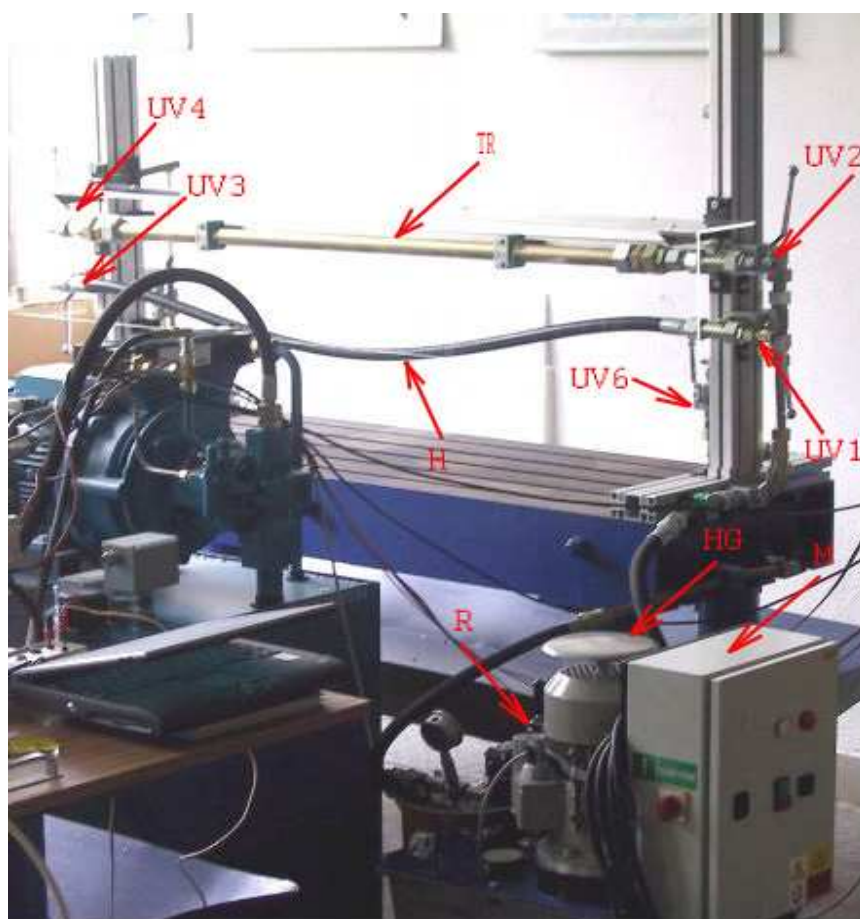
8) Po ukončení měření snížíme tlak na pojistném ventilu PV2 na minimální hodnotu, rozváděč R přestavíme do polohy 1, kdy kapalina přes něj protéká a otevřeme ventily UV1 až UV5, čímž zajistíme aby při odchodu z pracoviště nezůstala v trubce nebo hadici kapalina pod tlakem. Ventil UV6 zůstane uzavřen. Vypneme hydraulický agregát.

9) Před opakovaným spuštěním hydraulického agregátu a před opuštěním pracoviště je nutno vždy zkontrolovat zda je ventil UV6 úplně uzavřen, aby při následném spuštění agregátu nedošlo k úniku kapaliny přes odměrnou trubici do okolí!

Na obr. 4.2 je zobrazeno foto zařízení pro měření modulu pružnosti minerálního oleje a hadice. K hlavním částem patří měřená trubka a hadice upevněné mezi pravým a levým profilovým sloupkem zakrytované plexisklovým krytem, soustava ovládacích ventilů u levého a pravého sloupku a hydraulický agregát. Na obr. 8. je zobrazen detailní pohled na soustavu ovládacích ventilů.[1]

Tlak byl měřen pomocí snímače tlaku HYDROTECHNIK MULTI-SYSTEM M5000. Měřicí rozsah 0 – 400bar, (přesnost $\pm 0,5\%$) a zároveň byly tlaky odečítány na manometrech M1, M2.

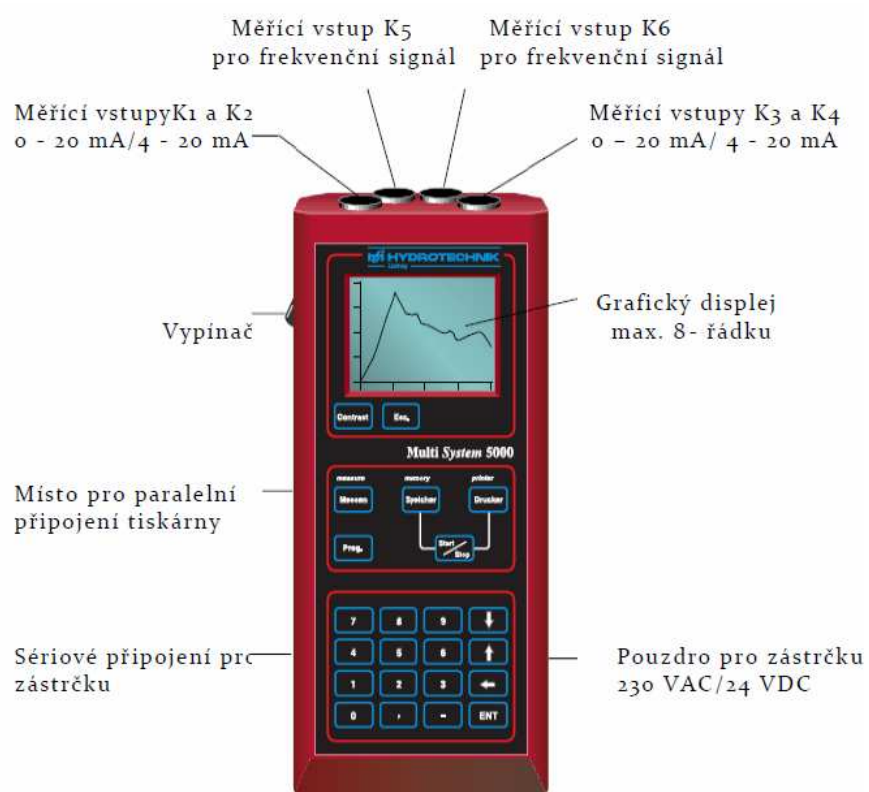
5.3 Foto měřicího zařízení



Obr. 7 Obvod pro měření modulu pružnosti minerálního oleje a hadice



Obr. 8 Detailní pohled na soustavu ovládacích ventilů



Obr. 9 Měřicí přístroj M5000

6. LABORATORNÍ MĚŘENÍ

Měření probíhalo v laboratoři katedry hydromechaniky a hydraulických zařízení. V době měření byly dobré podmínky. Místnost nebyla zaprášena, ani v ní nebyla příliš vysoká vlhkost nebo teplota.

Teplota okolí: 23°C

Teplota kapaliny: 35°C

6.1 Měřené hadice:

a) vnitřní průměr $d = 10$ mm, délka $l = 1,5$ m [14]

HANSA-FLEX HD 210 EN 853 2SN 10WP 330 bar x 1500

Tato hadice se používá pro střední vysokotlaké okruhy, odolává oleji na bázi polyglykolu, emulze vody – olej. Má dvě opletové vložky z vysoce pevného ocelového drátu, vnější vrstva ze syntetické pryže s vysokou odolností vůči teplotě, ozonu a povětrnosti. Odolává teplotám od -40°C až +100°C. Se změnou délky dosahující +2% až -4%. Provozní tlak 330 bar.

b) vnitřní průměr $d = 16$ mm, délka $l = 1,6$ m

HANSA – FLEX EN 853 2SN 16 WP 250 bar x 1600 [14]

Vysokotlaká hadice. Má dvě opletové vložky z vysoce pevného ocelového drátu, vnější vrstva ze syntetické pryže s vysokou odolností vůči teplotě, ozonu a povětrnosti. Odolává teplotám od -40°C až +100°C. Se změnou délky dosahující +2% až -4%. Provozní tlak 250 bar.

Rozměry: 250 bar x 1600 (světlost $d_H=16$ mm, délka $l_H= 1,6$ m, tloušťka stěny $s_H= 4,8$ mm)

c) vnitřní průměr $d = 19$ mm, délka $l = 1,5$ m

HANSA-FLEX HD 520 EN 856 4SH 19 WP 420 bar x 1500 [14]

Slouží pro vysokotlaké okruhy, odolávají oleji a syntetické pryži. Má čtyři vnitřní spirálové vložky z vysoce pevného ocelového drátu, zatímco vnější vrstvu má ze syntetické pryže s vysokou odolností vůči teplotě, ozonu a otěru. Rozsah teplot -40°C do +100°C. Změna délky +2% až -4%. Provozní tlak 420 bar.

Legenda k tab. 1, 2, 3:

Naměřené hodnoty:

- Δp ... pokles tlaku v trubce nebo hadici z tlaku p na tlak atmosférický
- Δh_{TR} ... změna hladiny oleje v odměrné trubici OT při otevření ventilu UV2 odpovídající množství kapaliny vyteklé z trubky při poklesu tlaku p v trubce na tlak atmosférický
- Δh_H ... změna hladiny oleje v odměrné trubici OT při otevření ventilu UV1 odpovídající množství kapaliny vyteklé z hadice při poklesu tlaku p v hadici na tlak atmosférický

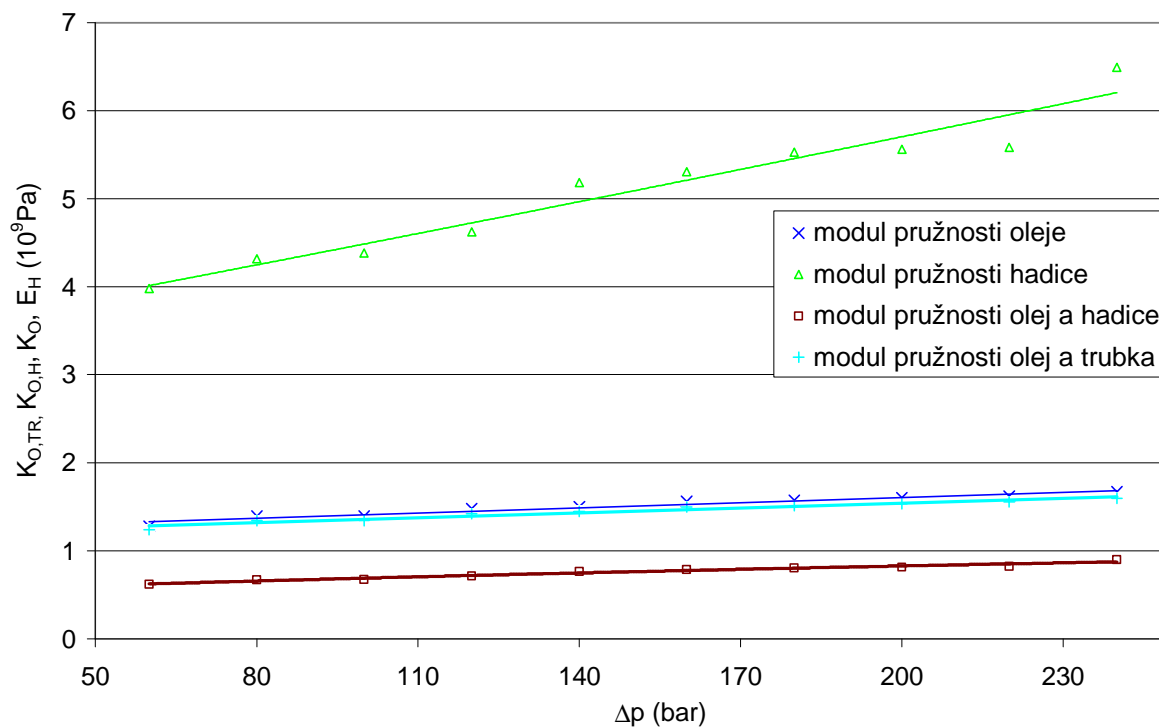
Vypočtené hodnoty:

- K_0 ... modul pružnosti oleje
- E_H ... modul pružnosti hadice
- $K_{O,ir}$...modul pružnosti oleje včetně vlivu hadice
- $K_{O,h}$...modul pružnosti oleje včetně vlivu hadice

HANSA – FLEX EN 853 2SN 16WP 250 bar

Tabulka naměřených a vypočtených hodnot pro hadici Ø16mm

č. měření	Δp	Δh_{TR}	Δh_H	K_0	E_H
[-]	[bar]	[m]	[m]	[10 ⁹ Pa]	[10 ⁹ Pa]
1	240	0,121	0,121	6,56E+08	5,84E+09
2	220	0,114	0,121	1,62E+09	5,58E+09
3	200	0,105	0,111	1,60E+09	5,56E+09
4	180	0,096	0,101	1,58E+09	5,53E+09
5	160	0,086	0,092	1,56E+09	5,31E+09
6	140	0,078	0,083	1,51E+08	5,18E+09
7	120	0,068	0,076	1,48E+09	4,63E+09
8	100	0,06	0,067	1,39E+09	4,38E+09
9	80	0,048	0,054	1,39E+09	4,32E+09
10	60	0,039	0,044	1,28E+09	3,98E+09



Obr. 10 Závislost modulů pružnosti na tlaku

Příklad výpočtu

Pro hadici o Ø16mm a měření č. 5

Trubka

Objem oleje v trubce

$$V_{O,TR} = \frac{\pi \cdot d_{TR}^2 \cdot l_{TR}}{4} = \frac{\pi \cdot 0,022^2 \cdot 1,6}{4} = 6,082 \cdot 10^{-4} m^3$$

Přírůstek objemu oleje v důsledku stlačitelnosti oleje a trubky

$$\Delta V_{O,TR} = \frac{\pi \cdot d_o^2 \cdot \Delta h_{TR}}{4} = \frac{\pi \cdot 0,0098^2 \cdot 0,078}{4} = 5,88 \cdot 10^{-6} m^3$$

Modul pružnosti soustavy olej a trubka

$$K_{O,TR} = \frac{V_{O,TR} \cdot \Delta p}{\Delta V_{O,TR}} = \frac{6,082 \cdot 10^{-4} \cdot 1,4 \cdot 10^7}{5,88 \cdot 10^{-6}} = 1,45 \cdot 10^9 Pa$$

Modul pružnosti oleje

$$K_O = \frac{1}{\frac{\Delta V_{O,TR}}{V_{O,TR}} - \frac{d_{TR}}{E_{TR} \cdot s_{TR}}} = \frac{1}{\frac{5,88 \cdot 10^{-6}}{6,082 \cdot 10^{-4} \cdot 1,4 \cdot 10^7} - \frac{0,022}{2,1 \cdot 10^{11} \cdot 0,004}} = 1,51 \cdot 10^9 [Pa]$$

Hadice

Objem oleje v hadici

$$V_{O,H} = \frac{\pi \cdot d_H^2 \cdot l_H}{4} = \frac{\pi \cdot 0,016^2 \cdot 1,7}{4} = 3,418 \cdot 10^{-4} m^3$$

Přírůstek objem oleje v důsledku stlačitelnosti oleje a hadice

$$\Delta V_{O,H} = \frac{\pi \cdot d_0^2 \cdot h_H}{4} = \frac{\pi \cdot 0,0098^2 \cdot 0,083}{4} = 6,26 \cdot 10^{-6} m^3$$

Modul pružnosti soustavy olej a hadice

$$K_{O,H} = \frac{V_{O,H} \cdot \Delta p}{\Delta V_{O,H}} = \frac{3,418 \cdot 10^{-4} \cdot 1,4 \cdot 10^7}{6,26 \cdot 10^{-6}} = 0,764 \cdot 10^9 Pa$$

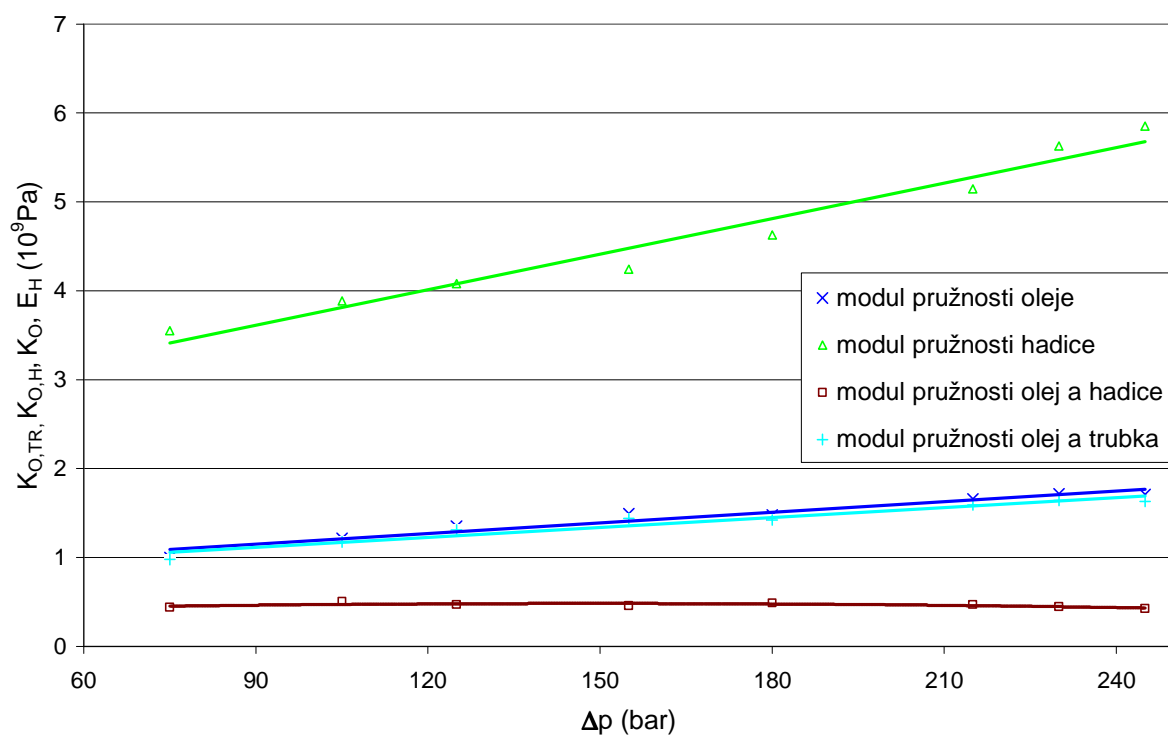
Modul pružnosti hadice

$$E_H = \frac{1}{\left(\frac{\Delta V_{O,H}}{V_{O,H} \cdot \Delta p} - \frac{1}{K_O} \right) \cdot \frac{s_H}{d_H}} = \frac{1}{\left(\frac{6,26 \cdot 10^{-6}}{3,418 \cdot 10^{-4} \cdot 1,4 \cdot 10^7} - \frac{1}{1,51 \cdot 10^9} \right) \cdot \frac{0,0048}{0,016}} = 5,18 \cdot 10^9 Pa$$

HANSA – FLEX HD210 EN 853 2SN 10WP330 bar

Tabulka naměřených a vypočtených hodnot pro hadici Ø10mm

č. měření	Δp	Δh _{TR}	Δh _h	K _O	E _H
[-]	[bar]	[m]	[m]	[10 ⁹ Pa]	[10 ⁹ Pa]
1	245	0,121	0,078	1,71E+09	5,90E+09
2	230	0,113	0,069	1,72E+09	5,54E+09
3	215	0,109	0,062	1,66E+09	5,25E+09
4	180	0,102	0,05	1,48E+09	4,99E+09
5	155	0,087	0,046	1,49E+09	4,69E+09
6	125	0,077	0,036	1,36E+09	4,27E+09
7	105	0,072	0,028	1,21E+09	4,10E+09
8	74,5	0,062	0,023	1,00E+08	3,22E+09

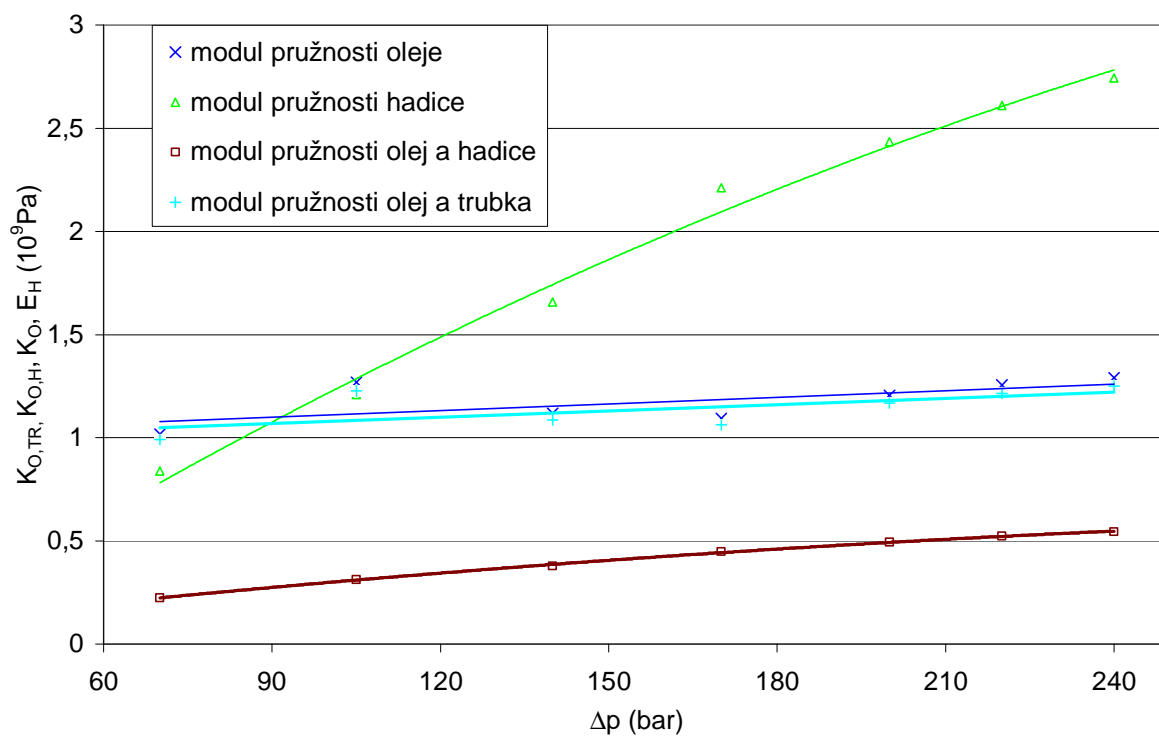


Obr. 11 Závislost modulů pružnosti na tlaku

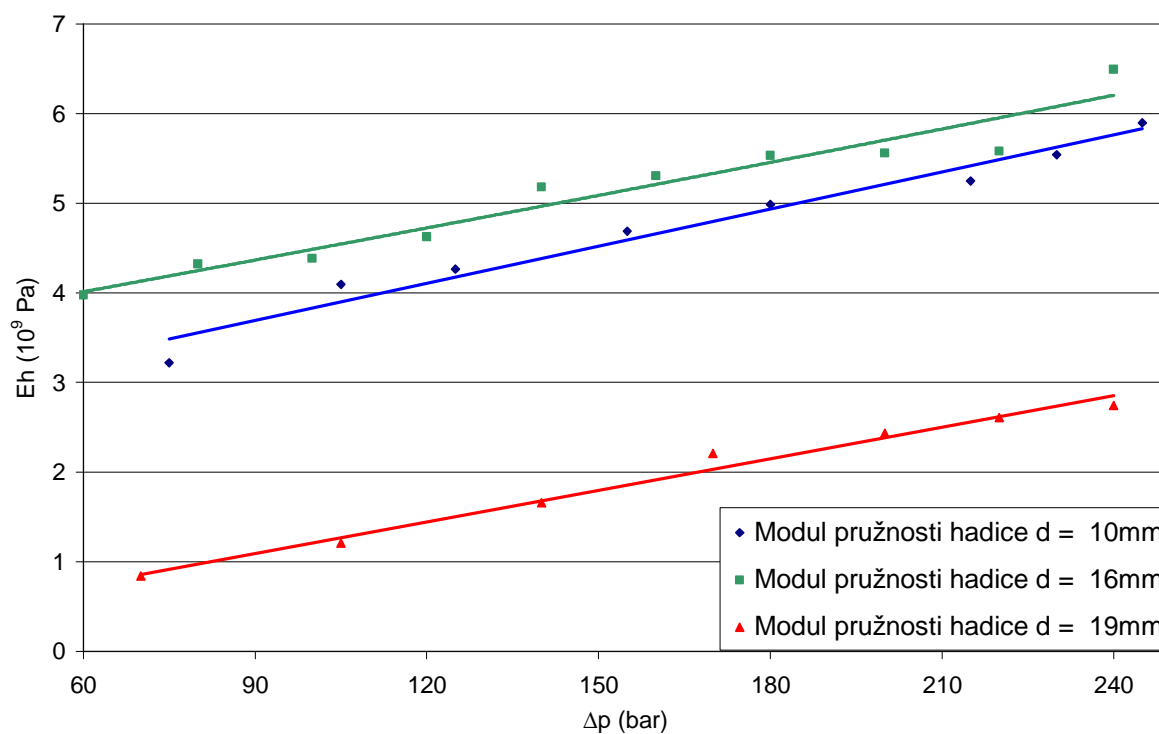
HANSA – FLEX HD520 EN856 4SH 19WP 420 bar

Tabulka naměřených a vypočtených hodnot pro hadici Ø 19mm

č. měření	Δp	Δh_{TR}	Δh_h	K_o	E_H
[-]	[bar]	[m]	[m]	[10^9 Pa]	[10^9 Pa]
1	240	0,155	0,0595	1,05E+01	2,18E+09
2	220	0,146	0,0568	1,12E+01	2,18E+09
3	200	0,138	0,0547	1,20E+01	2,18E+09
4	170	0,129	0,0512	1,29E+01	2,42E+09
5	140	0,104	0,0501	1,86E+01	2,18E+09
6	105	0,069	0,0453	4,22E+01	2,39E+09
7	70	0,057	0,0421	6,71E+01	2,90E+09



Obr. 12 Závislost modulů pružnosti na tlaku



Obr. 13 Moduly pružnosti hadic

7. ZÁVĚR

Cílem této bakalářské práce bylo změřit modul pružnosti hadice v závislosti na tlaku. Měření modulu pružnosti hadice se stanoví nepřímo, kdy se měří objem kapaliny vyteklé v důsledku stlačitelnosti kapaliny a hadice do odměrné nádoby při poklesu tlaku z hodnoty pracovního tlaku na tlak atmosférický. Zároveň je nutno znát modul pružnosti kapaliny, který se stanoví měřením množství vyteklé kapaliny, která v důsledku stlačitelnosti vyteče z trubky do odměrné nádoby při poklesu tlaku pracovního na tlak atmosférický.

Měření bylo provedeno pro 3 hadice o různých průměrech (Ø10mm, Ø16mm, Ø19mm).

Porovnáme-li ještě moduly pružnosti hadic a vložíme je do jednoho grafu (obr. č. 13), vyplývá z nich, že všechny tři křivky mají podobný průběh, přičemž se zvyšujícím se tlakem narůstá modul pružnosti tzn. křivky mají rostoucí průběh závislý na zvyšujícím se tlaku.

Porovnáme-li moduly pružnosti oleje, zjistíme, že modul pružnosti narůstá jen minimálně a vychází v hodnotách $K_o = (1,4 \cdot 10^9 - 1,8 \cdot 10^9)$ Pa, tzn. že mírně stoupá v závislosti na vzrůstajícím tlaku a odpovídá tabulkovým hodnotám v tab. 1. Modul pružnosti hadice narůstá v závislosti na tlaku mnohem rychleji a hodnoty se pohybují v rozmezí od $3 \cdot 10^9 - 7 \cdot 10^9$ Pa.

Nejnižší hodnoty modulů pružnosti má hadice o Ø19mm a to i přesto, že má nejvíce opletů ze všech- čtyři oplety. Tím se potvrdil předpoklad, že díky svému největšímu průměru je ze všech hadic nejvíce elastická a roztažná.

Pro hadice Ø10mm a Ø16mm, vyráběné ze syntetické pryže se dvěma oplety byly naměřeny moduly pružnosti vyšší. Je to dáno menšími světlostmi hadic.

Měření bylo provedeno pro rozsah tlaků od (50 – 250) bar. Jednalo se o měření tzv. statického modulu pružnosti hadice a kapaliny.

8. LITERATURA

- [1] Hružík, L. *Experimentální úlohy v tekutinových mechanizmech*. [online]. <<http://www.338.vsb.cz/PDF/Experimentalniulohyvtekutinovychmechanizmech.pdf>>.
- [2] Hružík, L. ;Vašina.M. *Experimentální stanovení modulu pružnosti hadic*. Jemná mechanika a optika. 2008, 5/2008, s. 133-135.
- [3] Kopáček, J. *Hydrostatické převodové mechanismy*. Praha, SNTL 1986, 195 s.
- [4] Kopáček, J.; Sivák, V. *Hydraulické mechanismy, návody pro výpočtová, laboratorní a konstrukční cvičení*. VŠB- TU Ostrava, 1970.
- [5] Sivák, V. *Projektování hydraulických systémů*. Skripta VŠB-TU Ostrava, 1990, 331 s. ISBN 80-7078-037-1.
- [6] Kopáček, J. *Objemový modul pružnosti pryžových hadic*. Strojírenská výroba: 1980, 12/1980, s. 931-937.
- [7] Kopáček, J.; Pavlok, B. *Tekutinové mechanismy*. Skripta VŠB. Ostrava, 2005, 150s. ISBN 80-248-0856-0.
- [8] Will, D.; Gebhardt, N. *Hydraulik Grundlagen, Komponenten, Schaltungen*. Berlin: Springer, 2008, 450 s. ISBN 978-3-540-79534.
- [9] Horst-W, Grollius. *Grundlagen der Hydraulik*. Fachbuchverlag Leibzig in Carl Hanse Verlag. 2008, 224 s. ISBN 978-3-446-41596-6.
- [10] Pavlok, B. *Hydraulické prvky a systémy. Díl 1. Kapaliny v hydrostatických mechanismech*. 2. vyd. Ostrava: VŠB – TU Ostrava, 2005, 154 s. ISBN 80-248-0857-9.
- [11] Pivoňka, J.. *Tekutinové mechanismy*. Praha: SNTL Praha, 1987, 623 s.
- [12] Janalík, J. *Měření tekutinových mechanismů*. Skripta. VŠB- TU Ostrava. 199, 152 s.
- [13] Drábková, S. *Mechanika tekutin*. Ostrava. 2007, ISBN 978-80-248-1508-4. [online]. < <http://www.338.vsb.cz/PDF/Drabkova-Mechanikatekutin.pdf>>.
- [14] *Hansaflex : hydraulické hadice* [online]. 2009. Dostupný z WWW: <<http://www.hansaflex.cz/index.php?page=online-katalog>>. www.hansaflex.cz.